

سنتز فیشر تروپش برروری کاتالیست هتروژن با استفاده از گاز سنتز

سیدامیر حسین سیدموسوی^۱، حسین آتشی^۱، فرشاد فرشچی تبریزی^{۲*}، سام رزمجوئی^۱

۱- ایران، زاهدان، دانشگاه سیستان و بلوچستان، گروه مهندسی شیمی، کدپستی ۹۸۱۶۷۴۵۹۳۶

۲- ایران، شیراز، دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی شیمی نفت و گاز، گروه مهندسی شیمی، کدپستی ۷۱۹۴۶۸۴۳۳۴

نویسنده مسئول، ایمیل: farshchi@shirazu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۰/۲۸ تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۲/۰۳

چکیده:

سنتز فیشر تروپش واکنشی است که بر اساس کاتالیست هتروژن بین منوکسید کربن و هیدروژن (گاز سنتز) صورت می‌گیرد. محصولات واکنش شامل مخلوطی از هیدروکربن‌ها و ترکیبات اکسیژن‌دار است که عموماً در بردارنده‌ی پارافین، الفین و الکل است. این فرآیند سوخت‌های هیدروکربنی تولید می‌کند که کیفیت بالایی دارد لذا توسعه آن می‌تواند بسیاری از مشکلات مربوط به آلودگی هوا را در صنعت حمل و نقل مرتفع نماید. جدیدترین بررسی مراجع نشان می‌دهد که از نقطه نظر مکانیسمی، مدل توزیع اندرسون شولز فلوری می‌تواند روند تولید ترکیبات هیدروکربنی را تبیین کند. راکتورهای بستر سیال، بستر ثابت و دوغابی سه نوع راکتور متداول در این فرآیند هستند که تنها دو راکتور آخر دارای کاربرد صنعتی هستند. فلزات گروه هشتم واسطه در جدول تناوبی مانند آهن، کبالت و روتنیوم به عنوان کاتالیست فرآیند مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما تنها آهن و کبالت مورد قبول صنعت قرار گرفته‌اند.

کلمات کلیدی: سنتز فیشر تروپش، گاز سنتز، کاتالیست هتروژن، آهن، کبالت

۱- مقدمه

رایج از عوامل سرطان‌زا در انسان بوده و سالانه مبالغ هنگفتی را برای درمان سرطان بر جوامع تحمیل می‌کند. با نگرشی دقیق درمی‌یابیم اینها تنها بخشی از مضرات سوخت‌های متداول هستند. در این میان هیدروژناسیون منوکسیدکربن می‌تواند هیدروکربن‌هایی بدون محتوای گوگردی و آروماتیکی تولید نماید [۳]. از آنجایی که بنزین تولید شده در واحدهای پتروشیمی در بیشتر موارد عدد اکتان لازم برای ارائه به بازار را دارا نیستند، افزایش عدد اکتان به کمک برخی افزودنی‌های شیمیایی، اغلب امری اجتناب‌ناپذیر تلقی می‌شود. در سال‌های گذشته از تترا اتیل سرب به‌منظور افزایش عدد اکتان بنزین استفاده می‌شد.

امروزه روند روبه رشد تقاضا برای سوخت‌های مایع در صنعت حمل و نقل از یک سو و همچنین محدودیت‌های منابع انرژی از دیگر سو سبب گردیده است تا توجه بسیاری از پژوهشگران به سمت فرآیندهایی برای تامین این نیازها سوق داده شود [۱]. انتشار گازهای گلخانه‌ای و دیگر آلاینده‌های حاصل از احتراق سوخت‌های فسیلی علاوه بر تاثیرات سوء بر روی محیط زیست، سبب گرمایش کره زمین گردیده است [۲]. وجود گوگرد در بنزین و گازوئیل سبب مسموم شدن کاتالیست‌های نصب شده در اگزوز خودروها و همچنین افزایش هزینه‌های جاری می‌گردد. علاوه بر این، ترکیبات آروماتیک موجود در سوخت‌های



روزافزون کمپانی‌های بزرگ نفتی به این فرآیند گردید. از سال ۱۹۸۰ میلادی به بعد کمپانی‌های بزرگی مانند شل^۴ و آکسون موبیل سرمایه‌گذاری‌های وسیعی در این صنعت نمودند [۹].

با افزایش بهای سوخت‌های مایع و توسعه‌ی فرآیندهای پلیمریزاسیون، نیاز جهان به تامین خوراک اولیه موردنیاز برای تولید پلیمرهای پرکاربرد مانند پلی اتیلن و پلی پروپیلن بیش از پیش تشدید گردید. در این میان سنتز فیشر تروپش^۵ به‌عنوان منبعی مناسب برای تامین گستره وسیعی از ترکیبات آلی، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفت. تاکنون مطالعات گسترده‌ای بر روی جوانب مختلف سنتز فیشر تروپش صورت پذیرفته است [۸]. همچنین نتایج مطلوبی از کار برخی محققان گزارش گردیده است [۱۱، ۱۲]. از این‌روست که شناخت ساختاری این فرآیند ضروری به نظر می‌رسد.

این پژوهش پس از شرح پیشینه و نحوه پیدایش سنتز فیشر تروپش، به شرح خوراک فرآیند و برخی از روش‌های متداول تولید خوراک می‌پردازد. با توصیف سازوکار فرآیند می‌توان درک بهتری از توزیع محصول را متصور بود. سپس به مقوله مهم انواع راکتورهای متداول در این فرآیند که شامل سه نوع: بستر سیال، بستر ثابت و دوغابی هستند می‌پردازیم. در نهایت نیز سعی شده است با بیان کاتالیست‌های مهم و صنعتی این سنتز بحث در مورد این موضوع تکمیل گردد.



شکل ۱- تصاویر هانس فیشر (سمت راست) و فرانس تروپش (سمت چپ) [۸]

انتشار ترکیبات سرب‌دار از اگزوز اتومبیل‌ها یکی از آثار زیان‌بار این ترکیب محسوب می‌شد که عوارض بازگشت‌ناپذیری را بر روی بدن انسان باقی می‌گذاشت. پس از ممنوعیت استفاده از ترکیبات سرب‌دار به‌منظور افزایش عدد اکتان بنزین، ترکیبات جایگزین نیز همواره باچالش مربوط به آثار سوء زیست محیطی روبرو بوده‌اند. از این‌روست که فرآیندی باقابلیت تولید بنزین باکیفیت، بدون نیاز به ترکیبات بالابرنده عدد اکتان، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است [۴].

برای اجتناب از مشکلات و نگرانی‌های یاد شده، ضرورت فرآیندی پاک که بتواند به‌عنوان جایگزینی مطمئن نیاز جهانی به سوخت‌های هیدروکربنی را با کمترین تنش‌های زیست محیطی تامین نماید بیش از پیش ضروری به نظر می‌رسد [۵]. سنتز فیشر تروپش به‌عنوان فرآیندی توانمند قادر است طیف گسترده‌ای از هیدروکربن‌ها را تولید کند [۶]. از میان محصولات تولید شده توسط این سنتز می‌توان به انواع ترکیبات خطی و شاخه‌دار الفینی، پارافینی و الکل‌ها اشاره نمود [۷]. از طرفی بنزین و سوخت دیزل تولید شده توسط این فرآیند ضمن بی‌نیازی از افزایش مجدد عدد اکتان، عاری از هرگونه آلودگی گوگردی و نیتروژنی است [۴، ۵].

در سال ۱۹۲۲ میلادی دو دانشمند آلمانی به نام‌های فرانس فیشر^۱ و هانس تروپش^۲ طی پژوهش‌های خود در آزمایشگاه انستیتو شیمی کایزر ویلهلم^۳ دریافتند با عبور گاز سنتز (مخلوط هیدروژن و منوکسید کربن) از بستر گرما داده شده حاوی کاتالیست فلزات واسطه، ترکیبات هیدروکربنی متفاوتی شامل سوخت دیزل، بنزین و الفین سبک تولید می‌گردد. انگیزه اصلی آنها از انجام این فرآیند، یعنی تبدیل گاز سنتز به‌دست آمده از فرآیند گازی کردن زغال سنگ به سوخت مایع، منجر به کشفی بزرگ گردید به‌طوری‌که در سال ۱۹۴۰ میلادی، آلمان یک میلیون تن از سوخت مایع مصرفی خود را با این سنتز تولید نمود [۸]. در سال ۱۹۵۵ میلادی شرکت ساسول در آفریقای جنوبی، سنتز فیشر تروپش را بر اساس کاتالیست آهن در راکتورهای فاز دوغابی در مقیاس صنعتی گسترش داد. آنها توانستند با استفاده از این فرآیند بیشتر نیاز خود به سوخت مایع را مرتفع سازند. نتایج به‌دست آمده توسط ساسول سبب توجه

1Franz Fischer

2Hans Tropsch

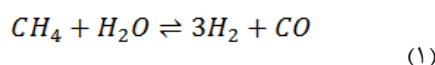
3Kaiser Wilhelm Institute for Chemistry

4Shell

5Exxon-Mobil

۲- خوراک فرآیند

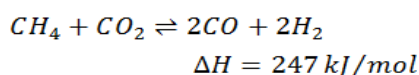
گاز سنتز (مخلوط هیدروژن و منوکسیدکربن) به عنوان خوراک اصلی این فرآیند می‌تواند از هر ماده دارای کربن به دست آید. معمولی‌ترین منابع کربن‌دار مورد استفاده برای تولید گاز سنتز عبارتند از گاز طبیعی، زغال، نفتا و زیست توده. با توجه به فرآیند مورد استفاده در تهیه گاز سنتز، محصول به دست آمده حاوی نسبت‌های متفاوتی از هیدروژن به منوکسیدکربن است. این نسبت تقریباً بین یک تا سه می‌تواند تغییر کند. از این رو ممکن است برای تهیه گونه‌های متفاوت شیمیایی، احتیاج به تغییر در این نسبت باشد. از دیگر سو وجود برخی مواد همانند بخار آب در گاز سنتز ممکن است برای برخی فرآیندهای کاتالیستی نامطلوب باشد که این امر پالایش گاز سنتز تولیدی را ضروری می‌نماید. فرآیند شکست حرارتی گاز متان به عنوان اصلی‌ترین تشکیل‌دهنده گاز طبیعی [۱۳] با بخار آب بر اساس معادله (۱)، مهم‌ترین منبع تامین گاز سنتز در مقیاس صنعتی محسوب می‌شود.



در عمل، شکست حرارتی متان با بخار آب به منظور تولید خوراک مورد نیاز در سنتز فیشتر تروپیش در راکتورهای لوله‌ای پر شده با کاتالیست نیکل در دمایی بین ۵۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد و فشار بین ۲۰ تا ۴۰ بار صورت می‌پذیرد. پس از انجام این فرآیند گاز سنتز تولید شده بعد از جداسازی برخی ترکیبات نامطلوب می‌تواند به راکتور فیشتر تروپیش تزریق گردد [۱۴]. یکی از مشکلات متداول در واحدهای تولید گاز سنتز، تشکیل کربن روی کاتالیست است که باعث به وجود آمدن مشکلات عدیده‌ای از جمله کاهش فعالیت کاتالیست، کاهش راندمان تولید، ایجاد نقاط داغ درون راکتور و در نتیجه وارد آمدن صدمات زیاد به راکتور، ایجاد گرادیان‌های شدید درون راکتور و در نتیجه وارد آمدن خسارت به کاتالیست و غیره می‌شود. بنابراین فرایندی مقرون به صرفه‌تر و معقول‌تر است که تشکیل کربن در آن کمترین مقدار باشد. در واحدهای ریفورمینگ تشکیل کربن به نوع کاتالیست و خوراک مصرفی بستگی دارد. طبق بررسی‌های به عمل آمده، سرعت نسبی تشکیل کربن روی کاتالیزورهای نیکل که بهترین کاتالیست مصرفی در فرایندهای ریفورمینگ هستند، در صورت استفاده از گاز متان به عنوان خوراک، کمترین میزان را داراست [۱۵].

از آنجایی که هدف نهایی از شکست حرارتی متان تولید گاز سنتز است، لذا کیفیت گاز سنتز تولیدی بسیار حائز اهمیت است. یکی از مهمترین مولفه‌های ارزیابی گاز سنتز، نسبت هیدروژن به منوکسید کربن در آن است. نسبت‌های بالاتر از دو، اغلب برای تولید ترکیباتی مانند متانول و نیز سنتز فیشتر تروپیش نامطلوب است. این نسبت در شکست حرارتی متان همراه با بخار آب، سه است که این مقدار می‌بایست به نحوی کاهش یابد. در صورت جایگزین شدن بخار آب با دی‌اکسیدکربن، معادله واکنش به صورت رابطه (۲) خواهد بود.

(۲)

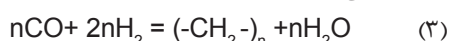


ابتدا به نظر می‌رسد نسبت خوراک در این فرآیند بهینه باشد و از این رو بتوان آنرا به راحتی در صنعت استفاده نمود ولی در عمل به دلیل کک‌زایی زیاد، این واکنش به سرعت کاتالیست فرآیند را مسموم می‌نماید. لذا از تزریق دی‌اکسیدکربن تنها برای کاهش نسبت هیدروژن به منوکسیدکربن استفاده می‌شود [۱۶].

در سال‌های اخیر استفاده از زیست توده به عنوان منبعی تجدیدپذیر در تولید گاز سنتز، بسیار رواج یافته است. لو و همکاران به منظور اجتناب از مصرف هرگونه سوخت فسیلی برای تهیه گاز سنتز از فرآیند گازی کردن فوق بحرانی زیست توده^۱ در یک راکتور خورشیدی در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد بهره جستند. برآوردهای گزارش شده توسط آنها نشان می‌دهد گاز سنتز تولید شده توسط این روش، مقرون به صرفه‌تر از محصول به دست آمده از سایر روش‌ها است [۷].

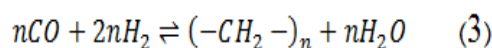
۳- سازوکار سنتز فیشتر تروپیش

سنتز فیشتر تروپیش را می‌توان به صورت یک واکنش پلیمریزاسیون مرحله‌ای در نظر گرفت که از مدل توزیع اندرسون شولز فلوری^۲ پیروی می‌نماید [۱۰]. مرحله تشکیل مونومر را می‌توان به مانند معادله (۳) در نظر گرفت [۱۸]:

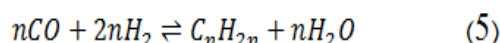
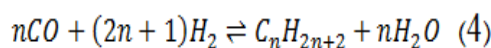


1Biomass

2Anderson - Shulz - Flory



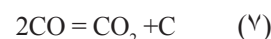
معادلات (۴) و (۵) به ترتیب مربوط به فرآیندهای تشکیل پارافین‌ها و الفین‌ها [۸] در سنتز فیشر تروپش هستند:



هر دو واکنش اخیر دارای ماهیت گرمازا هستند. همچنین ممکن است مقادیری از بخار آب تولیدی مجدداً با منوکسید کربن واکنش داده و تولید دی‌اکسید کربن کنند. این واکنش به واکنش جابجایی گاز-آب^۱ معروف است و بر طبق معادله (۶) صورت می‌پذیرد.



علاوه بر متان، کربن نیز به‌عنوان محصولی نامطلوب بر اساس واکنش بودار^۲ (۷) تولید می‌شود.



مدل اندرسون شولز فلوری، جزء مولی محصول تولیدی را بر اساس پلیمر شدن منومر تولید شده در معادله (۳) به صورت رابطه (۸) پیش‌بینی می‌کند:

$$X_n = (1-a) a^{n-1} \quad (8)$$

در این مدل a احتمال رشد زنجیر و X_n جزء مولی محصول تولید شده است. اما در عمل انحرافاتی از مدل ایده‌آل در توزیع محصول دیده می‌شود. در بین محصولات تولیدی، بیشترین انحراف مربوط به متان است [۱۰].

۳-۱- توزیع محصول

گاز متان در بیشتر موارد، درصد قابل توجهی از محصول تولیدی را تشکیل می‌دهد که کاهش میزان آن معمولاً

¹Water Gas Shift Reaction

²Boudouard Reaction

بسیار مطلوب است. البته در مواردی که از منابعی مانند زیست توده گاز سنتز به‌دست آید و هدف از فرآیند، افزایش محتوای انرژی حرارتی محصول باشد، از تولید مقادیر زیاد متان ممانعت به‌عمل نمی‌آید. صرف نظر از تولید گاز متان هدف از انجام سنتز فیشر تروپش اغلب تولید الفین‌های سبک مانند اتیلن و پروپیلن و یا تولید ترکیبات با ارزش سنگین (C_5^+) است. در این فرآیند، انتخاب‌پذیری محصول، قویاً از شرایط عملیاتی متأثر می‌شود. معمولاً افزایش دمای فرآیند سبب می‌گردد تا توزیع محصول به سمت محصولات با تعداد کربن کمتر سوق پیدا کند. در بیشتر موارد افزایش فشار کل، فرآیند را به سمت افزایش انتخاب‌پذیری ترکیبات سنگین هدایت می‌کند. از دیگر سو افزایش نسبت هیدروژن به منوکسید کربن در خوراک ورودی، تولید هیدروکربن‌های سبک را افزایش می‌دهد.

۴- راکتورهای متداول

در عمومی‌ترین دسته بندی از دیدگاه شرایط عملیاتی، راکتورهای متداول در سنتز فیشر تروپش به دو گروه دما بالا و دما پایین تقسیم می‌شوند. راکتورهای دما بالا در بیشتر موارد برای کاتالیست‌های بر پایه آهن و راکتورهای دما پایین برای کاتالیست‌های بر پایه کبالت و دیگر عناصر واسطه هم‌گروهش مورد استفاده قرار می‌گیرند. از دیگر سو راکتورهای عملیاتی را می‌توان بر اساس هیدرودمامیک و ساختارشان به سه گروه راکتورهای بستر سیال، بستر ثابت [۶] و دوغابی طبقه‌بندی نمود که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارند.

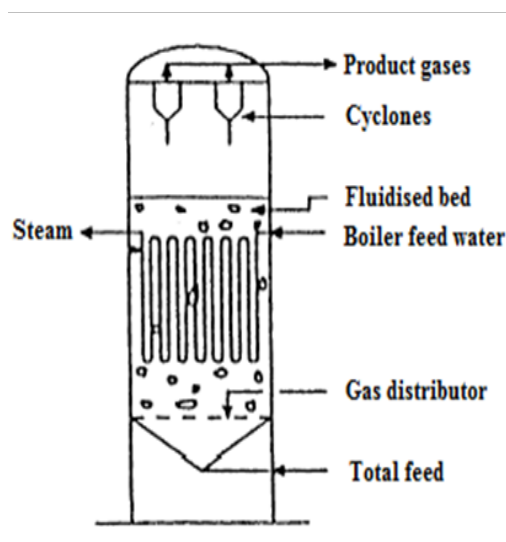
۴-۱- راکتور بستر سیال

راکتورهای بستر سیال اغلب در محدوده دمایی ۳۲۰ تا ۳۵۰ درجه سانتیگراد کار می‌کنند. از این‌رو برای فرآیندهای فیشر تروپش دما بالا (HTFT) مناسب هستند.

در راکتورهای بستر سیال به مانند آنچه در شکل ۲ دیده می‌شود، سرعت سیال ورودی در حدی است که بستر کاتالیستی کاملاً آشفته شده و به‌صورت سیالی در می‌آید. به دلیل سیالی شدن بستر، انتقال حرارت در این راکتورها بسیار خوب صورت می‌گیرد از این‌رو در دماهای بالا بسیار کارآمد هستند.



از معایب این راکتورها می‌توان به سایش بالای دانه‌های کاتالیست و نامناسب بودن آنها برای مصارف تحقیقاتی به دلیل میزان بالای خوراک مصرفی اشاره نمود [۸]. سایش مدام کاتالیست سبب می‌شود همواره مقداری از ذرات کاتالیست همراه با جریان خروجی، راکتور را ترک کند. به‌منظور اجتناب از مسمومیت محصول با ذرات ریز کاتالیست و بازیافت کاتالیست فرسوده شده، نصب سایکلون در خروجی راکتور ضروری است. با توجه به تبادل سریع حرارت، این‌گونه راکتورها (شکل ۲) همواره به لوله‌های محتوی بخار به صورت کویل در داخل پوسته مجهز هستند.



شکل ۲- راکتور بستر سیال [۱۹]

شدن کاتالیست منجر می‌شود [۲۰]. در راکتورهای بستر ثابت، سرعت سیال ورودی در حدی نیست که بتواند بستر کاتالیستی را به صورت سیال در بیاورد. به دلیل سهولت کاربرد و امکان افزایش فشار تا فشارهای بالا و همچنین ارزان‌تر بودن تجهیزات مورد نیاز، راکتورهای بستر ثابت مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته‌اند [۱، ۶، ۲۱، ۲۲]. جنس این رده از راکتورها در مطالعات تحقیقاتی عموماً از استیل بوده و به دلیل قطر کم راکتور (کمتر از ۲۰ میلیمتر) انتقال حرارت در آنها به سادگی صورت می‌پذیرد [۱۸، ۲۳]. لذا، تزریق برخی گازهای بی اثر مانند نیتروژن به همراه واکنش‌دهنده‌ها به داخل راکتورهای بستر ثابت می‌تواند تا حدود زیادی وضعیت انتقال حرارت در این‌گونه راکتورها را که اثری مستقیم بر توزیع محصول دارد، بهبود بخشد [۱۱، ۱۲].

شکل ۳ یک راکتور بستر ثابت را نشان می‌دهد که تعداد زیادی لوله به صورت موازی و عمودی در داخل پوسته‌ای استوانه‌ای قرار گرفته‌اند. سیال خنک‌کننده از بین لوله‌ها عبور می‌نماید و بعد از تبادل حرارت از بالای راکتور خارج می‌شود. گاز سنتز پس از عبور از میان ذرات کاتالیست در لوله‌های داخلی تبدیل به محصول می‌شود. محصول سبک تولیدی که عموماً شامل پارافین‌ها و الفین‌های کم کربن و سوخت‌های پاک است، از بالای راکتور خارج می‌شود. محصول سنگین که می‌تواند حاوی واکس باشد برای خروج، مسیر پایینی راکتور را انتخاب می‌نماید.

۳-۴- راکتور دوغابی

با روند پرشتاب توسعه سنتز فیش تروپش علاوه بر راکتورهای بستر ثابت، راکتورهای دوغابی در کانون توجهات صنعت قرار گرفته‌اند تا آنجا که کمپانی بزرگی مانند ساسول^۲ شمار قابل توجهی از واحدهای تولیدی خود را بر اساس راکتورهای دوغابی طراحی نموده است [۸]. بزرگ‌ترین مزیت راکتورهای دوغابی امکان کنترل دمای فوق‌العاده خوب آنهاست. در این‌گونه راکتورها، کاتالیست به صورت ذرات بسیار ریز در داخل مایعی بی اثر که معمولاً از بین پارافین‌های سنگین است، انتخاب می‌شود. عدم احتیاج به شکل‌دهی کاتالیست سبب می‌گردد تا با استفاده

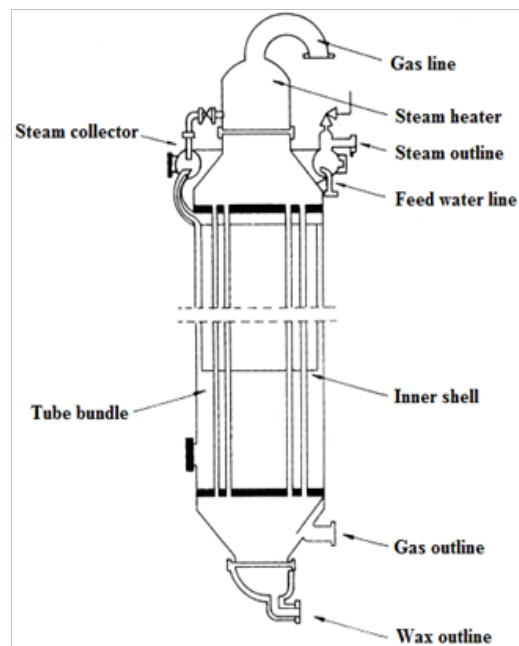
۴-۲- راکتور بستر ثابت

راکتور بستر ثابت برای واکنش دما پایین فیش تروپش بسیار مناسب است. این راکتورها در دمایی در حدود ۱۸۰ تا ۲۴۰ درجه سانتیگراد بسیار کارآمد هستند [۶] و به‌صورت چند لوله‌ای همراه با سیال خنک‌کننده گذرنده از بین دسته لوله‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. مسئله اصلی در این راکتور، انتقال گرمای تولید شده در بستر کاتالیستی است. در صورت عدم انتقال حرارت تولیدی از بستر کاتالیستی، افزایش کنترل نشده دما سبب ایجاد لکه داغ^۱ بر روی ذرات کاتالیست می‌گردد. پدیده لکه داغ در نهایت به غیر فعال

²Sasol

¹Hot Spot

از ذرات فوق ریز کاتالیست، پروفایل دما در داخل کاتالیست ایجاد نگردد.



شکل ۳- راکتور بستر ثابت لوله‌ای [۹۱]

تمام مواد در مخزنی بزرگ قرار دارند که توسط یک هم‌زن به خوبی با یکدیگر مخلوط می‌شوند ولی در بیشتر موارد ترجیح داده می‌شود به جای استفاده از هم‌زن مکانیکی، راکتور به‌گونه‌ای طراحی گردد تا جریان ورودی سبب آشفستگی و به هم خوردن مواد داخل راکتور شود [۴]. پایین‌تر بودن فشارهای عملیاتی، سهولت کنترل دما و طول عمر بالاتر کاتالیست سبب شده است تا برخی از پژوهشگران این گونه از راکتورها را مورد استفاده قرار دهند [۵].

۵- کاتالیست‌های فرآیند

به منظور افزایش کارایی، معمولاً کاتالیست‌های سنتز فیشتر تروپش از چندین جز تشکیل شده‌اند که عبارتند از پایه، فاز فعال و پروموتور. البته حضور پروموتور الزامی نیست ولی در برخی موارد استفاده از آن نتایج بسیار ارزشمندی را دربر دارد. در واقع در این فرآیند، کاتالیست اصلی‌ترین نقش را ایفا می‌نماید.

در بیشتر موارد، پایه به تنهایی فعالیت کاتالیستی محسوسی ندارد ولی استفاده از آن به‌عنوان محملی برای

فاز فعال، ضمن افزایش سطح تماس در دسترس برای واکنش‌های سطحی و بهبود انتقال حرارت، سبب کاهش چشمگیر هزینه‌های تولید می‌گردد. پایه کاتالیست می‌تواند ترکیبات اکسیدی دیرگداز مانند آلومینا [۵، ۷]، سیلیکا [۳]، [۶، ۱۱]، تیتانیا [۳، ۲۰]، منیزیا [۸]، زیرکینا [۳۰، ۱۶/۱/۳۰] و یا دیرگدازهای دیگری مانند کربید سیلیسیم [۲۰] و زئولیت [۱۲] باشد. با توجه به پژوهش‌های گسترده و پیشرفت‌های به‌دست آمده در عرصه تولید ترکیبات نانو، استفاده از پایه‌های نانو در کاتالیست‌های سنتز فیشتر تروپش توسط پژوهشگران توسعه یافته است [۱۱]. از آن جمله می‌توان به پژوهش‌های دیاز و همکاران اشاره نمود که توانستند با تجزیه کاتالیستی اتیلن بروی کاتالیست نیکل در دمای ۸۷۳ درجه کلوین، نانو فیبرهای کربنی^۱ ساختاریافته‌ای را سنتز نمایند. از آنجایی که واکنش‌های تبدیل در سطح کاتالیست به‌وقوع می‌پیوندند، بالا بودن مساحت ویژه کاتالیست بسیار حائز اهمیت است. در مورد پایه‌های متداول پس از تلقیح فاز فعال، اغلب میزان افت مساحت ویژه بسیار زیاد است. دیاز و همکاران با بهره‌گیری از نانو فیبرهای کربنی سنتز شده به عنوان پایه کاتالیست، میزان کاهش مساحت ویژه کاتالیست را کمتر از ده درصد گزارش نمودند، که این امر سبب افزایش تبدیل محصول مایع گردیده است [۲۳].

پوشش تک لایه‌ای آلومینای بسیار متخلخل با اکسید فلزهای واسطه‌ای مانند تیتانیوم یا لانتانیم، منجر به تولید پایه‌هایی با فعالیت بیشتر گردیده است. مطالعه دستگاهی FTIR^۲ این پایه‌ها پس از تلقیح با نمک کبالت نشان می‌دهد که فرکانس برگشت^۳ (مول محصول تولیدی بر مول سایت فعال بر زمان) دارای تابعیتی از میزان اسیدیتی سطح پایه است که در مقادیر نزدیک به خنثی، منجر به بالاترین انتخاب پذیری محصول سنگین می‌شود [۲۴].

فاز فعال در این فرآیند بیشتر شامل فلزات واسطه سنگینی مانند آهن، کبالت [۵-۷، ۱۱]، منگنز و روتنیوم [۷، ۱۰] است که بامکانیسم‌های متفاوتی توانایی تبدیل گاز سنتز به محصولات را داراست.

1 Carbon nanofibers

2 Fourier transform infrared spectroscopy

3 Turnover frequency

فاز فعال معمولاً به گونه‌ای انتخاب می‌گردد تا بیشترین انتخاب‌پذیری را برای محصول مطلوب محقق سازد و تولید محصولات نامطلوب در فرآیند را کمینه سازد. علت تمایل فلزات واسطه به جذب منوکسید کربن و هیدروژن و انجام واکنش سطحی را می‌توان در دارا بودن الکترون‌های ظرفیتی در اربیتال d در این فلزات دانست. بر این اساس می‌توان بیان نمود الکترون‌های منفرد در اربیتال d توانایی جذب ضعیف گونه‌های شیمیایی را در سطح فلز دارا هستند که این امر به کاهش انرژی فعالسازی واکنش منجر می‌شود. در حالی که این قابلیت برای سایر اربیتال‌ها مقدور نیست [۱۰].

پروموتورها فلزاتی مانند پتاسیم، مس [۸] و پلاتین [۴] هستند که نقش‌های متفاوتی مانند افزایش انتخاب‌پذیری محصول مطلوب و یا افزایش مقاومت مکانیکی ذرات کاتالیست ایفا می‌نمایند. به همین دلیل گاهی کاتالیست‌های حاوی پروموتور را کاتالیست‌های ارتقا یافته می‌نامند. هرچند میزان پروموتور موجود در کاتالیست معمولاً کم است ولی تاثیر آن بر توزیع بهینه محصول در بیشتر موارد بسیار چشمگیر است. ملکول‌های منوکسیدکربن به دلیل قطبی بودن و جرم ملکولی بالاتر نسبت به ملکول‌های هیدروژن، با شدت بیشتری بر روی سایت‌های فعال کاتالیست جذب می‌شوند. ادامه روند جذب منوکسیدکربن بر روی سایت‌های فعال کاتالیست سبب کاهش جذب هیدروژن می‌گردد. کاهش غلظت هیدروژن جذب شده در سایت‌های فعال سبب پایین آمدن سرعت واکنش‌های سطحی و در نهایت حصول توزیع محصول نامناسب خواهد شد. در این میان استفاده از پروموتور پتاسیم به دلیل دارا بودن یک الکترون آزاد در اربیتال خارجی خود، وضعیت الکترونیکی فاز فعال و پایه کاتالیست را به گونه‌ای متاثر می‌سازد تا با واجد منوکسیدکربن از روی سایت‌های فعال کاتالیست، امکان جذب بیشتر برای ملکول‌های هیدروژن فراهم آید. از این رو استفاده از پروموتور پتاسیم با بهبود سازوکار واکنش‌های سطحی سبب افزایش انتخاب‌پذیری محصول مطلوب می‌گردد [۸].

۵-۱- کاتالیست آهن

در بین تمام فلزات مورد استفاده در کاتالیست‌های صنعتی، تنها آهن و کبالت توانسته‌اند مقبولیت لازم را به لحاظ اقتصادی و عملیاتی کسب نمایند. در این بین آهن به دلیل

ارزان‌تر بودن نسبت به کبالت جایگاه ویژه‌ای را به خود اختصاص داده است. آهن به دلیل توانایی منحصر به فرد خود در انجام فرآیند شیفیت گاز آب می‌تواند مقداری از هیدروژن مورد استفاده در واکنش را خود تامین نماید. از این رو در مواردی که گاز سنتز تولیدی دارای نسبت‌های پایینی از هیدروژن به منوکسید کربن باشد مانند گاز سنتز تولید شده از گازی کردن زغال سنگ، استفاده از کاتالیست آهن نتایج بهتری را خواهد داشت [۱]. از مزیت‌های کاتالیست آهن می‌توان به گزینش‌پذیر بودن آن نسبت به الفین‌های سبک، ضمن تولید متان کم در دماهای بالا اشاره نمود. همچنین این کاتالیست توان آن را دارد تا با تغییر در شرایط عملیاتی، واکنش سنگین با کیفیت بالا تولید نماید. یکی از مخاطرات اصلی کاتالیست‌های هتروژنی، غیر فعال شدن سایت‌های فعال در اثر رسوب ترکیباتی مانند کک در سطح کاتالیست است. این پدیده واحدهای صنعتی را با مشکلات عدیده‌ای مواجه می‌سازد و سالانه هزینه‌های زیادی را بر آنها تحمیل می‌کند. از این‌روست که تولید کاتالیست‌هایی با مقاومت در برابر غیر فعال شدن، بسیار ضروری به نظر می‌رسد. دیاز و همکاران [۲۳] با استفاده از پایه‌هایی بر اساس نانوفایبرهای کربنی کاتالیست‌هایی با مقاومت بالا در برابر کک‌گرفتگی تولید نمودند. کک با اشغال سایت‌های فعال کاتالیست، فعالیت فاز فعال را به شدت کاهش می‌دهد. همچنین کاتالیست‌های تولیدی آنها به دلیل وجود فضاهای خالی با سایزهای یکسان در فایبرهای کربنی، دارای سطحی به مراتب بالاتر از نمونه‌های متداول بود. آنها بیان نمودند استفاده از نانوفایبرهای کربنی سبب بهبود توزیع محصول سنگین می‌گردد.

۵-۲- کاتالیست کبالت

استفاده از کاتالیست کبالت در سنتز فیشر تروپش منجر به تولید آلکان‌هایی با زنجیر طولانی می‌گردد که در طبقه‌بندی سوخت‌های فوق پاک قرار می‌گیرند. از جمله ویژگی‌های خوب این کاتالیست در مقایسه با کاتالیست آهن می‌توان به عدم حساسیت آن نسبت به اکسایش با بخار آب اشاره نمود. برای مقاصد صنعتی، غیرفعال شدن کاتالیست به توجه به گران‌تر بودن آن نسبت به کاتالیست‌های حاوی آهن مساله‌ای قابل تامل است. البته استفاده از پایه‌های نانو و نیز پایه‌های ترکیبی تا حدودی غیر فعال شدن کاتالیست را به تعویق می‌اندازد [۱۱].

از مزایای استفاده از کاتالیست‌های حاوی کبالت می‌توان به تولید محصول در دماهای پایین‌تر، فعالیت کاتالیستی زیاد و تولید مقادیر کمتر دی‌اکسیدکربن نسبت به کاتالیست‌های حاوی آهن اشاره نمود [۱۲]. شیمورا و همکاران [۵] با پژوهش بر روی گونه‌های فازی متفاوت از کاتالیست کبالت آلومینا نشان دادند تخلخل و ساختار فازی کاتالیست، فعالیت را به میزان چشمگیری تغییر می‌دهد. آنها طی پژوهش‌هایشان دریافتند پایه تتا آلومینا^۱ با BET^۲ متوسط $۸۴ \text{ (g/m}^3\text{)}$ ، بالاترین فعالیت را در بین آلومینا با فازهای متفاوت دارا است. کاتکوانسورا و همکاران با استفاده از کاتالیست بر پایه مخلوط سیلیکا-زیرکینا، ضمن افزایش فعالیت کاتالیست با بهره جستن از برهم‌کنش میان زیرکینا و کبالت توانستند تشکیل اکسید فلزی در سایت‌های فعال فلزی را به طور قابل توجهی کاهش دهند.

۳-۵- سایر کاتالیست‌ها

سایر فلزات واسطه گروه هشتم نیز می‌توانند به عنوان کاتالیست در سنتز فیشر تروپیش مورد استفاده قرار بگیرند ولی به دلیل گران بودن و نیز کمتر بودن فعالیت آنها نسبت به آهن و کبالت، کاربرد آنها در مقیاس صنعتی مناسب نیست. با این حال استفاده از آنها در مقادیر بسیار کم در کنار آهن و کبالت می‌تواند برخی از خواص کاتالیستی این فلزات را بهبود بخشد [۵]. به عنوان نمونه گزارش گردیده است [۲۵] که مطالعات طیف موزبائر کاتالیست آهن هم‌رسوبی با مولیبدن نشان می‌دهد، افزایش مولیبدن سبب پایداری فاز کربید تولید شده در سایت‌های فعال کاتالیست می‌شود. این امر سبب می‌گردد انتخاب‌پذیری برخی از محصولات ارزشمند مانند الفین‌های سبک افزایش یابد.

۴-۵- کاتالیست‌های دو فلزی

استفاده از کاتالیست‌های دوفلزی به‌طور فزاینده‌ای مورد توجه پژوهشگران مختلف قرار گرفته است. بیشتر مطالعات بروی استفاده از فلزات واسطه‌ای مانند کبالت، آهن، منگنز، روتنیوم و دیگر واسطه‌های سنگین متمرکز شده است. از جمله مزیت‌های استفاده از کاتالیست‌های

دو فلزی می‌توان به افزایش فعالیت کاتالیستی و نیز افزایش انتخاب‌پذیری محصولات بارزش اشاره نمود. لی و همکاران [۱] با استفاده از کاتالیست دو فلزی آهن نیکل توانستند ضمن کاهش تولید متان میزان تولید C_5^+ را به طور موثری افزایش دهند. بر اساس نتایج گزارش شده توسط آنها استفاده از کاتالیست دوفلزی با بهبود توزیع فلز در سطح پایه، میزان تبدیل منوکسید کربن را افزایش می‌دهد. بررسی طیف موزبائر^۳ کاتالیست تولیدی آنها نشان دهنده تولید مخلوطی از اکسید و کربید آهن در سطح کاتالیست در خلال انجام واکنش است. افزایش نیکل به کاتالیست حاوی آهن، ضمن کاهش تولید کربید، سبب افزایش تولید اکسید فلزی در سطح کاتالیست می‌گردد، که ادامه این روند سبب جابجایی شدید توزیع محصول از هیدروکربن‌های سنگین به سمت ترکیبات سبک‌تر و نهایتاً متان می‌شود.

۶- نتیجه‌گیری

امروزه دسترسی به منابع اولیه هیدروکربنی و همچنین سوخت‌های مایع با کیفیت به عنوان ابزاری اثرگذار در مناسبات سیاسی و اقتصادی جلوه‌گری می‌کند. در بحران انرژی امروز، سنتز فیشر تروپیش می‌تواند با خوراک اولیه گاز سنتز، تقریباً تمامی نیازهای صنایع مختلف به هیدروکربن‌های ساده را محقق سازد. پیشرفت‌های نوین بر پایه تحلیل کاتالیست با روش‌های دستگاهی جدید و به کارگیری ترکیبات نانو سبب افزایش کارایی این فرآیند گردیده است. از دیگر سو زیست توده به‌عنوان منبعی بی‌پایان و تجدیدپذیر می‌تواند سهم قابل توجهی از گاز سنتز مورد نیاز برای خوراک فرآیند را تامین نماید. همچنین به کارگیری راکتورهای خورشیدی می‌تواند نقطه عطفی در تحول این فرآیند محسوب گردد.

تولید ترکیبات هیدروکربنی متفاوت از طریق واکنش میان منواکسید کربن و هیدروژن با استفاده از کاتالیست هتروژن حاوی عناصر واسطه گروه هشتم، هدف اصلی سنتز فیشر تروپیش است. ترکیبات تولیدی توسط سنتز فیشر تروپیش می‌توانند به‌عنوان سوخت‌های پاک با عدد اکتان بالا مورد استفاده قرار گیرند.

1-Alumina

2Brunaur-Emmet-Teller

3Mossbauer spectroscopy

این فرآیند می‌تواند طیف گسترده‌ای از ترکیبات آلی سبک، سنگین، خطی و شاخه‌دار پارافینی، الفینی و الکلی را تولید کند. گاز سنتز به‌عنوان خوراک فرآیند مورد استفاده قرار می‌گیرد و به منظور تولید ترکیبات ارزشمندتر بهتر است نسبت هیدروژن به منوکسیدکربن خوراک بالا نباشد.

ماهیت شیمیایی کاتالیست باقابلیت انجام واکنش‌های سطحی متفاوت و همچنین شرایط عملیاتی حاکم بر راکتور کاتالیستی، تعیین کننده توزیع محصول نهایی خواهند بود. در بیشتر موارد وزن ملکولی محصول سنگین تولیدی از مدل اندرسون شولز فلوری پیروی می‌نماید. تولید متان به‌عنوان واکنشی نامطلوب می‌تواند منجر به کاهش تولید الفین‌های سبک با ارزش گردد که افزایش دما باعث تسریع در این پدیده می‌شود. تغییر در شرایط عملیاتی سبب تغییر در مکانیسم‌های حاکم بر فرآیند می‌گردد.

راکتورهای بستر ثابت و راکتورهای دوغابی عمده راکتورهایی هستند که در این فرآیند به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. البته به دلیل سهولت کاربرد، بیشتر پژوهشگران راکتورهای بستر ثابت را برای تحقیق بر روی کاتالیست فرآیند برگزیده‌اند، ولی در مقیاس صنعتی شمار قابل توجهی از واحدهای صنعتی بر اساس راکتور دوغابی طراحی شده‌اند.

به‌منظور ارتقا کارایی، کاتالیست‌های سنتز فیشر تروپش اغلب از چندین جز تشکیل شده‌اند. این اجزا در کلی‌ترین حالت عبارتند از: پایه، فاز فعال و پروموتور. اکسیدهای دیرگداز، زئولیت‌ها، کربیدهای شبه‌فلزی و نیز اخیراً نانوساختارهای کربنی متداول‌ترین پایه‌ها را شامل می‌شوند. پایه به‌عنوان محملی مناسب، فاز فعال یا همان فلز را به‌همراه پروموتور در بر می‌گیرد. پروموتورها که کمترین درصد را در اجزا کاتالیست به خود اختصاص می‌دهند، معمولاً سبب بهبود توزیع محصول می‌گردند.

فلزاتی مانند کبالت، آهن، منگنز و روتنیوم از نقطه نظر کاتالیستی ضمن تولید رادیکال‌های آزاد در سطح فلز با مکانیسم‌های گوناگون منجر به تشکیل گستره وسیعی از هیدروکربن‌ها می‌شوند. در میان فلزات یاد شده تنها آهن و کبالت توانسته‌اند جایگاه صنعتی قابل قبولی را به خود اختصاص دهند. کاتالیست‌های آهنی می‌توانند در دماهای بالاتر، گاز سنتز با محتوای هیدروژن کمتر را به الفین‌های سبک و نیز واکنش‌های عاری از آلایندگی تبدیل نمایند. برای واکنش در دماهای پایین‌تر، کاتالیست‌های کبالتی، پارافین‌هایی با زنجیر طولانی‌تر تولید می‌نمایند.

همچنین استفاده از کاتالیست‌های چند فلزی توانسته است مشکلاتی از قبیل کک‌گرفتنی و تبدیل نامناسب را به طور جدی بهبود بخشد.

۷- منابع

- [1] Li T, Wang H, Yang Y, Xiang H, Li Y, 2014. Study on an iron-nickel bimetallic Fischer-Tropsch synthesis catalyst. *Fuel Processing Technology*, 118:117-24.
- [2] Kempegowda RS, del Alamo Serrano G, Güell BM, Tran K-Q, 2014. Techno-economic Analysis of Biomass to Fischer-tropsch Diesel Production with and without CCS Under Norwegian Conditions. *Energy Procedia*, 61:1248-51.
- [3] Melaet G, Ralston WT, Li C-S, 2014. Alayoglu S, An K, Musselwhite N, et al. Evidence of Highly Active Cobalt Oxide Catalyst for the Fischer-Tropsch Synthesis and CO₂ Hydrogenation. *Journal of the American Chemical Society*, 136:2260-3.
- [4] Pendyala VRR, Jacobs G, Ma W, Klettlinger JLS, Yen CH, Davis BH, 2014. Fischer-Tropsch synthesis: effect of catalyst particle (sieve) size range on activity, selectivity, and aging of a Pt promoted Co/Al₂O₃ catalyst. *Chemical Engineering Journal*, 249:279-84.
- [5] Shimura K, Miyazawa T, Hanaoka T, Hirata S. 2014. Fischer-Tropsch synthesis over alumina supported cobalt catalyst: Effect of crystal phase and pore structure of alumina support. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 394:22-32.
- [6] Kllaigaew K, Samart C, Chaiya C, Yoneyama Y, Tsubaki N, Reubroycharoen P, 2014. Effect of preparation methods on activation of cobalt catalyst supported on silica fiber for Fischer-Tropsch synthesis. *Chemical Engineering Journal*.
- [7] Parnian MJ, Khodadadi AA, Taheri Najafabadi, A., Mortazavi Y, 2014. Preferential chemical vapor deposition of ruthenium on cobalt with highly enhanced activity and selectivity for Fischer-Tropsch synthesis. *Applied Catalysis A: General*, 470:221-31.
- [8] Jahangiri H, Bennett J, Mahjoubi P, Wilson K, Gu S, 2014. A review of advanced catalyst development for Fischer-Tropsch synthesis of hydrocarbons from biomass derived syn-gas. *Catalysis Science & Technology*, 4:2210-29.

- cobalt catalysts. *Chemical Engineering Journal*, 247:75-84.
- [21] Zhao Y-H, Wang Y-J, Hao Q-Q, Liu Z-T, Liu Z-W, 2014. Effective activation of montmorillonite and its application for Fischer-Tropsch synthesis over ruthenium promoted cobalt. *Fuel Processing Technology*.
- [22] Park N, Kim J-R, Yoo Y, Lee J, Park M-J, 2014. Modeling of a pilot-scale fixed-bed reactor for iron-based Fischer-Tropsch synthesis: Two-dimensional approach for optimal tube diameter. *Fuel*, 122:229-35.
- [23] Diaz JA, Akhavan H, Romero A, Garcia-Minguillan AM, Romero R, Giroir-Fendler A, 2014. Cobalt and iron supported on carbon nanofibers as catalysts for Fischer-Tropsch synthesis. *Fuel Processing Technology*, 128:417-24.
- [24] Prieto G, De Mello MIS, Concepción P, Murciano R, Pergher SBC, Martínez An, 2015. Cobalt-Catalyzed Fischer-Tropsch Synthesis: Chemical Nature of the Oxide Support as a Performance Descriptor. *ACS Catalysis*, 5:3323-35.
- [25] Qin S, Zhang C, Wu B, Xu J, Xiang H, Li Y, 2010. Fe-Mo Catalysts with High Resistance to Carbon Deposition During Fischer-Tropsch Synthesis. *Catalysis letters*, 139:123-8.
- [9] Krylova AY, 2014. Products of the Fischer-Tropsch synthesis (A Review). *Solid Fuel Chem*, 48:22-35.
- [10] Pilot IAW, van Santen RA, Hensen EJM, 2014. The Optimally Performing Fischer-Tropsch Catalyst. *Angewandte Chemie*, 126:12960-4.
- [11] Munnik P, de Jongh PE, de Jong KP, 2014. Control and Impact of the Nanoscale Distribution of Supported Cobalt Particles Used in Fischer-Tropsch Catalysis. *Journal of the American Chemical Society*, 136:7333-40.
- [12] Yao M, Yao N, Shao Y, Han Q, Ma C, Yuan C, 2014. New insight into the activity of ZSM-5 supported Co and CoRu bifunctional Fischer-Tropsch synthesis catalyst. *Chemical Engineering Journal*, 239:408-15.
- [13] Butcher H, Quenzel CJE, Breziner L, Mettes J, Wilhite BA, Bossard P, 2014. Design of an annular microchannel reactor (AMR) for hydrogen and/or syngas production via methane steam reforming. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- [14] Baek SM, Kang JH, Lee K-J, Nam JH, 2014. A numerical study of the effectiveness factors of nickel catalyst pellets used in steam methane reforming for residential fuel cell applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39:9180-92.
- [15] Jeon SW, Yoon WJ, Baek C, Kim Y, 2013. Minimization of hot spot in a microchannel reactor for steam reforming of methane with the stripe combustion catalyst layer. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38:13982-90.
- [16] Li Y, Wang Y, Zhang X, Mi Z, 2008. Thermodynamic analysis of autothermal steam and CO₂ reforming of methane. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33:2507-14.
- [17] Lu Y, Zhao L, Guo L, 2011. Technical and economic evaluation of solar hydrogen production by supercritical water gasification of biomass in China. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36:14349-59.
- [18] Kangvansura P, Schulz H, Suramitr A, Poo-arporn Y, Viravathana P, Worayingyong A, 2014. Reduced cobalt phases of ZrO₂ and Ru/ZrO₂ promoted cobalt catalysts and product distributions from Fischer-Tropsch synthesis. *Materials Science and Engineering: B*, 190:82-9.
- [19] Steynberg A, Dry M, 2004. *Fischer-Tropsch Technology*: Elsevier.
- [20] Zhu X, Lu X, Liu X, Hildebrandt D, Glasser D, 2014. Heat transfer study with and without Fischer-Tropsch reaction in a fixed bed reactor with TiO₂, SiO₂, and SiC supported



Fischer Tropsch Synthesis on Heterogeneous Catalyst by Using Syngas

Seyed Amir Hossein Seyed Mousavi¹, Hossein Atashi¹,
Farshad Farshchi Tabrizi^{2*}, Sam Razmjooei¹

1- Department of Chemical Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

2- Department of Chemical Engineering, School of Chemical and Petroleum Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran.

Corresponding Author, Email: farshchi@shirazu.ac.ir

Abstract

Fischer Tropsch Synthesis is a reaction that takes place between carbon monoxide and hydrogen (syngas) based on heterogeneous catalyst. Products of the reaction include a mixture of hydrocarbons and oxygenates, comprising mainly of paraffin, olefin and alcohol. This process produces high quality hydrocarbon fuels and hence its development can alleviate many problems relating to transportation industry pollution. The most recent investigation of references reveals that from the mechanistic viewpoint, Anderson Schulz-Flory distribution model can determine the trend of hydrocarbon formation. Fluidized bed, fixed bed and slurry phase reactors are the three common types of reactors in the process; however, only the last two reactors have industrial usage. Metals from the VIII B group of the periodic table such as iron, cobalt and ruthenium are used as process catalysts. However, only iron and cobalt have been accepted for industrial application.

Keywords: Fischer Tropsch Synthesis; Syngas; Heterogeneous Catalysis; Iron; Cobalt;

